

衰落信道下多级编码方案的软判决译码

隋爱芬¹,袁东风²,邓所云¹,杨义先¹

(1. 北京邮电大学信息安全中心 126[#],北京 100876;2. 山东大学电子工程系,山东济南 250100)

摘 要: 研究 Rayleigh 衰落信道下,软判决译码对三种不同映射方案多级编码系统性能的影响.基于信道容量规则,构造卷积码为分量码的 8ASK 多级编码系统,在多阶段译码中提出利用信道状态信息的软判决支路度量计算公式,并探讨系统的误码传播特性,研究结果可为衰落信道编码调制方案的最佳设计度量提供参考.

关键词: 软判决 Viterbi 译码;多级编码;多阶段译码;映射;衰落信道

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 07-1044-04

Soft Decision Decoding for Multilevel Codes with Different Mapping Strategies in Fading Channels

SUI Ai-fen¹, YUAN Dong-feng², Deng Suo-yun¹, YANG Yi-xian¹

(1. P. O. Box 126, Inform. Security Center, Beijing University of Posts & Telecom., Beijing 100876, China;

2. Dept. of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China)

Abstract: This paper focuses on the influence of soft decision decoding on multilevel coding (MLC) schemes with different mapping strategies over Rayleigh fading channels. Based on Capacity Rule, 8ASK MLC systems are constructed using punctured convolutional codes. The formulations for computing the soft decision metrics with Channel State Information (CSI) are presented for multi-stage decoding (MSD) and the performance comparisons are made for soft- and hard-decision. The error propagation resulted from the lower level is also discussed. The results can present some references for the optimal design of MLC in fading channels.

Key words: soft-decision Viterbi decoding;MLC(Multi-level Coding);MSD(Multi-stage Decoding);mapping;fading channels

1 引言

与传统的网格编码调制(TCM)相比,多级编码(Multilevel Coding)技术^[1]解除了信号星座维数和码率之间的必然联系,因而可以提供灵活的传输率、固有不等保护度,而且其分量码可以选择卷积码、分组码或级联码. Huber^[2]等人证明当且仅当适当选择分量码率的情况下,采用多阶段译码(Multistage Decoding)的多级编码方案可以达到系统容量.文[3]分析、比较了5种码率设计规则,证明信道容量规则+分量码采用最佳译码的MSD技术可以达到信道容量,不能严格按容量规则选择码率时,必须采用最大似然译码技术才能达到相同的系统性能.我们知道对于单级纠错码,软判决译码是一种渐近最佳的译码方案,因此可以认为信道容量规则+分量码采用软判决译码的MSD技术是一种渐近最佳方案.文[3]还分析指出分量码采用硬判决译码的MLC/MSD不是渐近最佳的,AWGN信道下8ASK的MLC/MSD系统,随带宽有效性的降低,硬判决和软判决的性能差异逐渐变大.可见,研究衰落信道下,软判决译码在MLC/MSD系统中的应用是很有意义的.

过去关于MLC的研究,集中在分量码为分组码并采用硬判决译码的情况^[4~6].本文基于信道容量规则,选用删除型卷积码作分量码构造MLC系统,比较衰落信道下,软判决译码对三种映射方案的影响,在多阶段译码中提出利用信道状态信息的软判决支路度量计算公式,并探讨系统的误码传播特性,为衰落信道编码调制方案的设计度量提供参考.本文还可以为软判决译码在其它编码调制方案中的应用提供参考.

2 多级编码(MLC)原理及其关键技术

多级编码的核心思想是用不同级上的码(称为分量码)对不同信息位进行保护.发送信号点 $s \in A$ 与接收信号点 $y \in Y$ 间的平均互信息 $I(Y;A)$ 等于多级形成的地址矢量 $S = \{0,1\}^L$ 与接收信号点间的平均互信息:

$$\begin{aligned} I(Y;A) &= I(Y;S^1, S^2, \dots, S^L) \\ &= I(Y;S^1) + I(Y;S^2|S^1) + \\ &\quad \dots + I(Y;S^L|S^1 S^2 \dots S^{L-1}) \end{aligned} \quad (1)$$

收稿日期:2001-04-02;修回日期:2001-12-05

基金项目:东南大学移动通信国家重点实验室开放基金(No. W99001);国家重点基础研究发展规划项目(No. G1999035805);国家杰出青年基金项目(No. 69425001);国家自然科学基金项目(No. 69872020,69882002,60073049)

即向量 s 在物理信道上的传输可视为在 l 个等价信道上数字 s^i 的并行传输. 在 MLC 的设计中, 有两个关键部分: 一是分量码的设计; 二是多级编码形成的地址矢量到信号星座点间的映射规则.

“信道容量规则”是一种有效的分量码设计规则^[3]: 给定一种含 2^l 个信号星座点的数字调制方案, MLC 方案(共 l 级)的第 i 级码率 R^i 等于第 i 级等价信道的信道容量 C^i :

$$R^i = C^i, i = 1, 2, \dots, l \quad (2)$$

只要使各级分量码工作在 MLC 方案的信道容量限上, 容量规则可给各级提供最大的传输率, 并且具有任意小的误码率.

有限长度码构成的多级编码系统, 其性能受映射方式的影响^[3]. 一定的集分割方案加上信号点的标签, 就构成了多级编码地址矢量到信号星座点之间的映射^[7]. 自然分割 UP^[8]的基本思想是通过每一次集分割过程, 使子集内信号点的最小欧氏距离不断增大. 分组分割 BP(Block Partitioning)的思想与 UP 相反. 第三种集分割方案是 UP 与 BP 的混合方案, 称为 MP (Mixed Partitioning). 本文采用的 MP 结构是 BP-UP-UP 结构. UP 方案在 AWGN 信道下是最佳的, 寻找衰落信道下最佳映射方案也是个有意义的课题.

3 采用软判决的多阶段译码原理

3.1 多阶段译码(MSD)原理

目前多级编码的译码方法主要有三种: 最大似然译码(MLD)、多阶段译码(MSD)、和并行译码(PDL). 多阶段译码(MSD)^[1]复杂度较最大似然译码低的多, 但译码性能却是渐近最佳的, 是多级编码方案的一种理想的译码方法. 在多阶段译码中, 译码过程分阶段进行, 一次译一个分量码, 后一级的译码以前面的译码结果为参考.

定义以下概率: 给定信道输入 s 时, 信道输出 y 的条件概率为 $p(y/s)$; 给定编码器输出 $s_1, s_2, \dots, s_i (i = 1, 2, \dots, l)$ 时, y 的条件概率为 $p_i(y/s_1 s_2 \dots s_i)$. 因为 s 和 (s_1, s_2, \dots, s_l) 一一对应, 故

$$p_l(y/s_1 s_2 \dots s_l) = p(y/s) \quad (3)$$

$$p_i(y/s_1 \dots s_i) = \prod_{s_{i+1}=0}^1 \dots \prod_{s_l=0}^1 P_l(y/s_1 \dots s_l) P(s_{i+1} \dots s_l) \quad (4)$$

定义给定 y 和 s_1, s_2, \dots, s_{i-1} 时, s_i 的条件概率是 $p_i(s_i/s_1 \dots s_{i-1} y)$; 接收信号概率是 $p(y)$. 有:

$$P_i(s_i/s_1 \dots s_{i-1} y) = \frac{p_i(y/s_1 \dots s_i) P(s_1 \dots s_i)}{p_{i-1}(y/s_1 \dots s_{i-1}) P(s_1 \dots s_{i-1})} \quad (i = 2, \dots, l) \quad (5)$$

由后验概率准则可以根据式(5)来估计 s_i . 硬判决情况下

若 $P_i(0/s_1 \dots s_{i-1} y) \geq P_i(1/s_1 \dots s_{i-1} y)$ 则 $\bar{s}_i = 0$

若 $P_i(0/s_1 \dots s_{i-1} y) < P_i(1/s_1 \dots s_{i-1} y)$ 则 $\bar{s}_i = 1$,

采用软判决时, 需要计算对数似然比. 为区分译码前后的估计值, 我们把 \bar{s}_i 叫做中间估计值, 译码后的 \hat{s}_i 叫做最终估计值. 由于接收端不知道 s_1, \dots, s_{i-1} , 接收机只能利用最终估计值 $\hat{s}_1, \dots, \hat{s}_{i-1}$ 来代替 s_1, \dots, s_{i-1} . 如果二者相等的概率足够大, 则根据式(5)估计 s_i 比仅根据 y 估计 s_i 更可靠.

以上计算的前提是 s_1, \dots, s_l 的联合概率已知, 一般很难

确定这个值. 由于译码电路通常不利用信源的特征, 可作如下假设: s_1, \dots, s_l 统计独立, 且 $s_i = 0$ 和 $s_i = 1$ 的概率均为 $1/2$, 则 $P_i(s_i/\hat{s}_1 \dots \hat{s}_{i-1} y)$ 可用 $P_i(y/\hat{s}_1 \dots \hat{s}_{i-1} s_i)$ 代替, 且式(4)可转换为:

$$p_i(y/s_1 \dots s_i) = \prod_{s_{i+1}=0}^1 \dots \prod_{s_l=0}^1 P_l(y/s_1 \dots s_l) \quad (6)$$

这样就可以利用式(6)代替式(5)来估计 s_i . 这就是 MSD 译码的思路.

3.2 利用信道状态信息的软判决 MSD 技术

当分量码选用卷积码时, 可以采用软判决 Viterbi 算法. Seshadri 等人针对 8PSK 调制的 MLC 提出基于符号的 MSD 技术^[4]. 以三级 MLC 为例. 第 1 级译码如下: 对每个接收到的符号 y_j , 译码器找到在第一次集分割后形成的两个子集中的一个最近点, 在每个子集中, 有 4 个信号点, 它们都具有相同的“最不important比特” b_1 , 令对应 $b_1 = 0$ 和 $b_1 = 1$ 的每 4 个点被分别标号为: $S_j(k/b_1 = 0)$ 和 $S_j(k/b_1 = 1)$, 采用分组分割时 k 由 $4b_1 + 2b_2 + b_3$ 给定, j 对应接收序列的第 j 个时刻. 译码器使用 Viterbi 算法完成译码, 在时刻 j , 译码器计算每符号“欧氏度量”:

$$M_j(i) = \min_{k, b_1=i} |y_j - S_j(k/b_1 = i)|^2, i = 0, 1 \quad (7)$$

译码器输出第 1 级的信息序列估计值 \hat{q}_1^j , \hat{q}_1^j 再经过一次 c^1 码编码器, 得到相应的码字估计值 \hat{b}_{1j} , 送入下一级译码器.

译分量码 c^2 和 c^3 时, 第 j 时刻的每符号欧氏度量分别是:

$$M_j(i) = \min_{k, b_2=i, b_1=\hat{b}_{1j}} |y_j - S_j(k/b_2 = i, \hat{b}_{1j})|^2, i = 0, 1 \quad (8)$$

$$M_j(i) = |y_j - S_j(k/b_3 = i, \hat{b}_{2j}, \hat{b}_{1j})|^2, i = 0, 1 \quad (9)$$

这里使用“欧氏度量”是合理的工程选择, 文[6]证明这不是“最佳的”, 但使用最佳度量得到的增益不大. 本文将上述方法推广应用到 8ASK 系统中, 为提高系统性能, 将信道状态信息应用于支路度量计算中, 以第 1 级译码为例:

$$M_j(i) = \min_{k, b_1=i} |y_j - S_j(k/b_1 = i)|^2, i = 0, 1 \quad (10)$$

针对 8ASK 调制的特点, 本文还采用了对信道输出的限幅.

采用硬判决译码时, 比较欧氏度量 $M_j(0)$ 与 $M_j(1)$ 的大小, 当 $M_j(0) \leq M_j(1)$ 时, 每符号度量取为 0, 反之取为 1, 进入 Viterbi 译码器的支路度量计算中, 其它过程与软判决的情况相同. 由于译码过程中, 信道软输出 y_j 被用于各级分量码的译码, 所以硬判决的 MSD 也能够应用信息输出软信息. 这可以推出一个结论: 采用硬判决译码时, 一种有效利用信道信息的方法是把编码和译码过程分为多级.

4 仿真及结果分析

AWGN 信道下多级编码方案的性能估计见文[10], Rayleigh 信道下 8ASK 的 MLC 性能估计还没有报道. 本文提出利用信道状态信息的软判决支路度量计算公式, 采用仿真的方法研究系统性能. 前期我们计算了 UP、BP、MP 三种映射方式、8ASK 数字调制的三级 MLC 在 Rayleigh 信道中的信道容

量^[7],总码率为 2.5 比特/符号的值如表 1.

表 1 Rayleigh 信道下,不同映射方式 MLC/MSD 系统的等价信道容量,总码率=2.5 比特/符号

UP	BP	MP
$C^1 = R^1 = 0.59$	$C^1 = R^1 = 0.9$	$C^1 = R^1 = 0.925$
$C^2 = R^2 = 0.91$	$C^2 = R^2 = 0.85$	$C^2 = R^2 = 0.65$
$C^3 = R^3 = 1$	$C^3 = R^3 = 0.75$	$C^3 = R^3 = 0.925$

依据表 1 选取分量码率,采用文[9]导出的 $(m-1)/m$ 率删除型卷积码作为 MLC 的分量码,码率范围从 1/2 到 13/14,母码选用 $(2, 1, 3)$ 卷积码,仿真独立 Rayleigh 信道下,UP、BP、MP 三种映射方式的 8ASK MLC/MSD 性能.图 1~3 表示不同分量码采用软判决译码时系统性能的变化,1S 表示第 1 级采用软判决,2S 表示第 1 级和第 2 级采用软判决,3S 表示三级均采用软判决,HDD 表示三级均采用硬判决译码.可看出在 Rayleigh 衰落信道下:

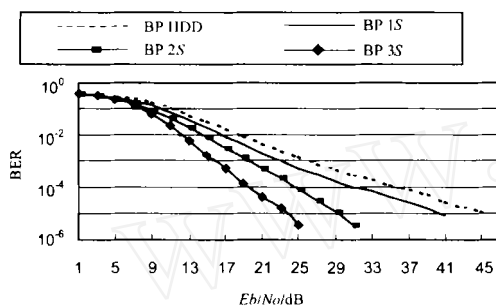


图 1 独立 Rayleigh 信道,BP 映射方式,分量码译码方法不同时,系统性能比较

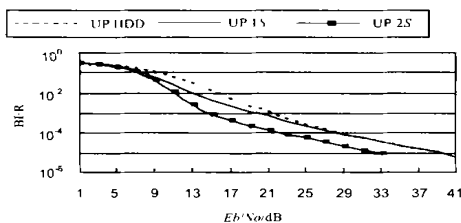


图 2 独立 Rayleigh 信道,UP 映射方式,分量码译码方法不同时,系统性能比较

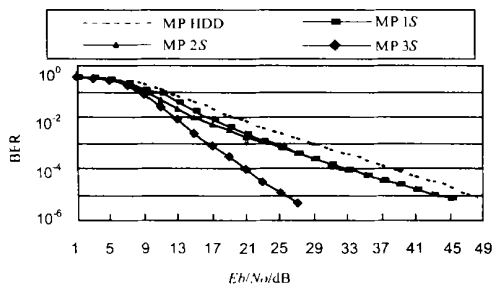
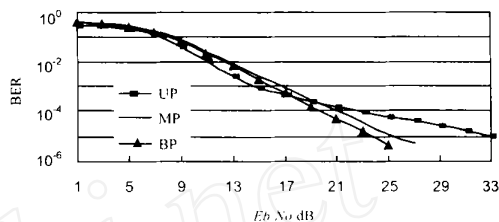


图 3 独立 Rayleigh 信道,MP 映射方式,分量码译码方法不同时,系统性能比较

(1)BP 方案(图 1),相邻曲线之间的间隔明显,说明每一级采用软判决,性能均有显著改善,BP 方案适合采用软判决译码,也说明该方案隐含误码传播.

(2)UP 方案(图 2),曲线 1S 和 2S 在 BER 较高时几乎重合,说明仅在第 1 级采用软判决,系统性能改善很小.这是由于第 1 级码率最低,在高 E_b/N_0 时,采用软判决已不能提高性能;这也说明 UP 映射可有效减少误码传播.

(3)MP 方案(图 3),仅第 1 级采用软判,系统性能有较大改善;在第 2 级采用软判决,性能改善很小.说明第 1 级引入误码传播较大,第 2 级引入误码传播较小,由于本文的 MP 方案是 BP-UP-UP,进一步验证了图 1 与图 2 的结果:BP 方案隐含误码传播,UP 方案可有效减少误码传播.



BP: $R^1 = 0.9, R^2 = 0.8333, R^3 = 0.75, R = 2.4833$
MP: $R^1 = 0.9167, R^2 = 0.6667, R^3 = 0.9167, R = 2.5$
UP: $R^1 = 0.6667, R^2 = 0.8333, R^3 = 1, R = 2.5$

图 4 独立 Rayleigh 信道,三级均采用软判决译码,BP、UP、MP 方案性能比较

图 4 是三种映射方案采用软判决译码时的性能比较,可以看出:

(1)BP 映射方案具有软降低特性,即 E_b/N_0 增大时,BER 始终保持良好的下降趋势,原因是等价信道容量满足: $C^i \geq C^{i+1}, i=1, \dots, J-1$,这种特性可自适应于时变 SNR 信道^[3].而 UP 方案在高信噪比时出现 BER 的平台.

(2)低信噪比时,三种映射方式性能相近.中等信噪比时,UP 方案性能好于 BP,原因是 UP 方案中,较低编码级对较高级的误码传播不严重.随信噪比增大,BP 方案取得最佳性能.

(3)MP 方案与 BP 方案的性能几乎同样好,由于这种方案中有两级码率相同,可有效节约硬件设备,也是较好的选择.

5 结论

本文研究衰落信道下软判决译码对不同映射方案的 MLC/MSD 系统的影响,得出以下结论:

(1)软判决 BP 映射 MLC 方案具有软降低特性,在 SNR 变化时,BER 体现了良好的下降趋势,可以自适应于信噪比的变化.UP 方案不具有自适应特性,在高信噪比时,出现 BER 的平台.

(2)在采用硬判决译码时,多级编码方案是利用信道软信息的一种有效方式.

(3)采用软判决译码,当系统要求误比特率低于 10^{-4} 时,BP 方案性能最好,UP 方案性能最差,MP 方案介于二者之间.这与分量码采用分组码时的结论一致^[11].本文的 BP 方案,BER 达到 10^{-5} 所需 E_b/N_0 仅为 23.5dB.

(4)UP 方案可有效降低系统误码传播;BP 方案固有误码传播特性,各级分量码采用软判决,均可获得较大编码增益,更适合采用软判决译码.

参考文献:

- [1] H Inai ,S Hirakawa. A new multilevel coding method using error-correcting codes [J]. IEEE Trans. Inform. Theory ,May 1977 ,23 (3) :371 - 377.
- [2] J Huber ,U Wachsmann. Capacities of equivalent channels in multilevel coding schemes [J]. Electron. Lett. ,Mar. 1994 ,30 :557 - 558.
- [3] U Wachsmann ,R F H Fischer ,J Huber. Multilevel codes :Theoretical concepts and practical design rules [J]. IEEE Trans. Inform. Theory , July 1999 ,45 (5) :1361 - 1391.
- [4] C -E. W, Sundberg ,N Seshadri. Coded modulations for fading channels :an overview ,ETT [J]. May-June ,1993 ,4 (3) :309 - 324.
- [5] U Wachsmann ,J Huber ,P Schramm. Comparison of coded modulation Scheme for the AWGN and the rayleigh fading channel [A]. IEEE ISIT '98 [C]. Boston : ISIT ,1998.
- [6] T Wörz ,J Hagenauer. Multistage coding and decoding for A MPSK system [A]. GLOBECOM '90 [C]. San Diego ,California : GLOBECOM ,1990.
- [7] Dong-Feng Yuan ,Zhi-Gang Cao ,D W Schill ,J Huber. Robust signal constellation design for AWGN and Rayleigh fading channels for softly degrading communication schemes using multilevel codes [J]. Chinese Journal of Electronics ,2000 ,9 (2) :115 - 121.
- [8] G Ungerboeck. Channel coding with multilevel/phase signals [J]. IEEE Trans. Inform. Theory ,1982 ,28 (1) :55 - 67.
- [9] Yutaka Yasuda ,Kanshiro Kashika ,Yasuo Hirata. High-rate punctured convolutional codes for soft decision viterbi decoding [J]. IEEE Trans. Commun. ,1984 ,32 (3) :315 - 319.
- [10] A G Burr ,T J Lunn. Block-coded modulation optimized for finite error rate on the white gaussian noise channel [J]. IEEE Trans. Inform. Theory ,1997 ,IT-43 :373 - 385.
- [11] 袁东风 ,姚旗等. 移动衰落信道中设计多级编码 (MLC) 方案的一种非欧度量 [J]. 电子学报 ,2001 (1) :32 - 35.

作者简介:



隋爱芬 女,1974 年生于山东省东营市,2000 年毕业于山东大学,获通信与信息系统专业硕士学位,现为北京邮电大学博士生,发表论文 20 篇,研究方向为移动通信纠错抗干扰、编码调制技术和信息安全。

袁东风 男,1958 年生于山东省济南市,博士、教授,博士生导师,2000 年于清华大学电子工程系毕业,获通信与信息系统专业博士学位,1993~1994 年加拿大 Calgary 大学任访问教授,1998~1999 年德国 Erlangen 大学任访问教授。发表论文 150 余篇,主要研究领域有信息理论与技术、移动通信纠错编码抗干扰及调制编码技术等。